

注:

# 三维气象数据可视化系统

梅鸿辉<sup>1)</sup>, 陈海东<sup>1)</sup>, 朱标<sup>1)</sup>, 肇昕<sup>1)</sup>, 刘昊南<sup>1)</sup>, 陈为<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310058)

摘要 针对

关键词 可视化系统; 气象数据;

中图法分类号 TP391.72

## 3D Climate Data Visualization System

Mei Honghui<sup>1</sup>, Chen Haidong<sup>1</sup>, Zhubiao<sup>1</sup>, Zhao Xin<sup>1</sup>, Liu Haonan<sup>1</sup>, Chen Wei<sup>1</sup>

<sup>1)</sup>(State Key Lab of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310058)

**Abstract** There are

**Keywords** visualization system; meteorological data;

近年来, 大气探测技术取得显著发展, 已初步实现全球大气三维立体探测, 但大气体可视技术的发展相对滞后。一般的遥感软件及气象可视化分析软件仅支持二维层析数据的可视化和面三维可视化, 或者间接体可视化, 如等值面抽取技术等, 不支持真正的三维体可视化, 而三维体可视对于研究大气的内部结构及其水平和垂直运动规律具有更为重要的意义。

从数据分析和可视化的角度看, 气象信息三维可视化近年来发展迅速, 但与其它领域相比还有一定差距。气象数据具有多源性、多维性、数据量大和多尺度特征等特点。由于不同地空环境具有不同的物理属性, 且其空间尺度、时间跨度呈现多样性, 在这类复杂地空环境下仿真多源大气信息加剧了大气信息处理的难度, 对其建模更显挑战性与重要性。研究和开发三维时变的大规模大气数据可视化系统成为当务之急。目前, 相关三维可视化技术和理论体系比较完善, 在生物、医学、地质、大气等领域已有很多成功的应用, 关系数据库已有较成熟的理论技术和广泛的应用, 并行计算架构(并行计

算 MPI, OPENMP 等)以及 GPU 的出现和发展为更大规模气象数据处理和实时可视化的研发提供了强有力的支持。

气象信息除了涉及到地图绘制的遥感像数据, 还有可能会包含各温度、云气压等方面的信息在地理上分布情况, 数据规模相当庞大, 而对于同一地点言对应的数据种类也会有很多。根据气象信息的地理属性, 需要在统一信系中整合不同可视化方法来满足各种各样的应用需求。从地理信息开发角度来看, 必须要有一个高效、鲁棒且易于扩展的可视化平台, 使可视化平台与领域之间具有低耦合度, 而更加通用, 通过层次化、组件的架构可以满足对视平台软扩展性和通用需求。从气象领域来看, 作为一个具体的应用基于这样地理信息系统搭建的气象数据可视化平台将带来更加直观的数据分析和展示, 给气象工作人员极大的帮助, 也可以作为一个向大众普及气象科学良好平台。

收稿日期: 年-月-日\*投稿时不填写此项\*; 最终修改稿收到日期: 年-月-日. 本文得到国家自然科学基金重点项目(61232012)、国家自然科学基金(61202279)、浙江省自然科学基金(LR13F020001)、教育部博士点基金(20120101110134)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(2013QNA5010) 的资助.汪飞, 男, 1979年生, 在读博士生, E-mail: wolflyecn@gmail.com, 讲师, 主要研究方向为可视化与可视分析.陈为, 男, 1976年生, 教授, 博导, E-mail: chenwei@cad.zju.edu.cn, 教授, 主要研究方向为可视化与可视分析.陶煜波, 男, 1980年生, 博士, E-mail: taoyubo@cad.zju.edu.cn, 副教授, 主要研究方向为可视化(通讯作者).鲍虎军, 1966年生, 教授, 博导, E-mail: bao@cad.zju.edu.cn, 研究员, 主要研究方向为图形学.

# 1 相关工作与背景知识

## 1.1 气象信息可视化

气象信息的显示分析系统的主要研究对象天气图最早出现在 1820 年,此后一直到 20 世纪 60 年代,天气图填绘一直靠手工操作。随着计算机在气象领域中的应用,20 世纪 70 年代开始出现了天气图自动填图系统,气象工作者通过绘图软件驱动绘图仪将气象信息绘制在印刷好的具有地理信息的天气地图上进行分析数据,然后手工标注等值线和各种天气符号。该阶段也有一些气象信息显示分析软件和开发工具面世,如 NCAR(cite)气象数据绘图包和基于脚本语言的 GrADS(cite)系统,但功能有限,应用面较小。在上世纪九十年代末以后,气象数据日益剧增,同时气象地理信息技术也发展迅速,中国气象局则开始使用自行研制的 Micaps 系统进行数据的分析和处理,给气象工作者提供了极大便利。Micaps(气象信息查询分析系统)(cite)是一个基于多种固定格式文件的二维气象信息查询分析系统,可对各种气象数据进行简单分析。三维的气象信息分析系统以 Wisconsin 大学空间科学工程中心 SSEC 开发的 Vis5D(cite)系统为代表,5D 是指在地理的三维上加上时间和数据要素。其定位主要是面向科研单位进行数值预报资料的分析,对中尺度的气象系统有很好的分析功能。

气象信息三维可视化近年来发展迅速,该领域比较有影响的是来自美国宇航局(NASA)的开源软件 WorldWind(cite),它能够跟踪全球范围内的近期事件、天气变化、火灾等情况的能力,可以展示 NASA 提供的一系列模拟全球飓风动态、季节变迁等活动的演示动画,并能根据用户指定时间范围,从网站获取气温、云量、降水等数据进行展示。

## 1.2 基于网页的可视化

信息可视化研究者们对于在网页上进行基本的数据可视化的尝试已进行了多年,但大多还仅局限于传统的图表如直方图、散点图等,科学领域的三维可视化技术应用则更为有限。受限于浏览器的运算和绘制能力(cite),大数据规模、包含复杂图形绘制的可视化系统仍需设计成独立的客户端程序。想要在网页上进行复杂三维场景的绘制,通过服务器端进行绘制是一种可行的实现方法,即通过 Ajax(异步 JavaScript 和 XML)技术的应用,将复杂绘制的请求传递给服务器,由服务器绘制完成后将

结果以图片的形式异步传回并绘制在屏幕上。这样的做法将交互与绘制和计算分离开,使得三维场景的绘制不再受限于浏览器的性能限制。

另一方面,在 HTML5 的基础上,WebGL 也已有了长足的发展,简单的三维场景已经能直接通过浏览器进行实时绘制。目前已经有许多开源的 WebGL 库可以使用,如最广泛使用的通用 WebGL 库 Three.js(cite)、用于游戏开发、数据可视化和创意代码的框架 PhiloGL(cite)和可以简化向量和矩阵使用的 GLMatrix(cite)等。

使用 HTML5 编写的网页应用优势在于使用方便,不需要安装和部署,任何人通过网路就能访问。随着 iPhone 和 Android 等智能手机的崛起,应用程序的跨平台化越发显得重要,而 HTML5 有着天然的跨平台优势,WebGL 与 HTML5 配合可以轻易的生成跨平台的三维绘制程序。

# 2 地理信息表达和气象数据可视化

为了展现地球的三维真实场景,通常采用将卫星影像和地形数据结合进行可视化的方法。在 GIS 中,卫星影像又称为数字正投(Digital Orthophoto Model, DOM),地形数据又称作高程模型信息(Digital Elevation Model, DEM)。利用虚拟现实的技术,将高分辨率卫星影像和数字程信息综合表达从而使得在普通 PC 上实时展示大规模真感三维地形环境成为可能。在场景的交互中,加入以用户为心的视点角度使可在地表遨游强体验。

## 2.1 地理信息绘制

大规模的地理场景构建中,包括了大量的数据采样点,以及大量的卫星影像数据和地形数据,怎样高效的管理使用这些数据,进行快速实时的场景绘制是本文面临的一个问题。在这里本文主要使用了多分辨率的地形场景模型和基于视点的场景剪裁以达到实时绘制的目的。

在数据预处理阶段,采用了基于影像的 LOD 存储方式。(分块)

按照地表影像数据将分块层以后,地球整体的绘制则转化为地表分块集合的绘制。根据视点剪裁原理,只需要锥体内的相应地形分块,这些分块位于不同层次,为了得到更高质量的结果,在绘制时候尽可能采用高分辨率层次的地形与影像数据。本文采用了基于四叉树的地表分块绘制算法。

由于计算机的内存大小有限,大规模场景对应

影像和地表数据不能全部调入内存中。虽然可以通过操作系统的虚拟来映射数据文件,但是并没有针对本文的特定应用制优化调度算法,因此这种方式并不理想。因此本文设计了基于四叉树的调度策略来解决这个问题。

结合地表分块组织的四叉树结构如图1所示,经过基于当前视点的场景剪裁与地表分块选择后,灰色节点为最终绘制节点,称其为“活动节点”,称活动节点的父节点为“扩展节点”(如标号为1、2、3、4的节点)。绘制活动节点与扩展节点都能绘制出当前场景,但绘制活动节点能够得到最高的分辨率。本文系统内存中同时保存了所有活动节点与扩展节点。这在基于网络传输的绘制的时候显得尤为重要,因为网络传输不能达到数据实时获取,而这时候使用活动节点的父节点则能得到最理想的效果。尽管如此,由于活动节点与扩展节点均在视锥体内,而在每一个层次,可见的节点数量有限,因此占用的内存也为常量。

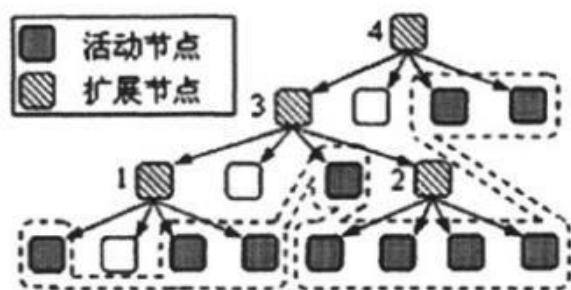


图1 地表数据动态调度结点

在漫游过程中,当视点移动缓慢时,由于帧与帧之间有较大的相关性,需要从外存调入的数据量很小,因此能满足实时绘制要求;当视点移动较快时,数据的调度跟不上绘制的速度,使用内存中分辨率较低的扩展节点绘制地表,而不必使绘制进程等待。事实上,本文在用户鼠标交互的过程中使用了停止调度的方式,这时候仅仅绘制函数重复执行,当用户的交互停止时,调用调度函数,然后重新绘制。这种方式提高了绘制速度,虽然降低了绘制质量,但是在这种情况下,用户是可以接受的。

## 2.2 三维大气数据可视化

按照每个数据点的测量值的维度可以将气象数据分为标量场数据(一维),矢量场数据(二维),张量场数据( $n$ 维)。其中标量场主要包括温度场、气压场、湿度场、云场(云水混合比)等数据,矢量场数据主要包括风场、洋流场等数据,它们使用

垂直于地面的两个维度方向的数据进行表示。

平台主要对标量场数据和矢量场数据的可视化。由于气象数据具有经度、纬度、气压高度三个维度,因此是典型的三维数据。其中数值预报以及融合、仿真数据分为三维标量场数据、三维矢量场数据两种,还有卫星遥感数据以及地面基站采集的常规资料数据等。

### 2.2.1 标量场数据可视化

针对三维标量场数据(云场、温度场等),平台提供等值线、等值面、直接体绘制、切片绘制等可视化方法。

**等值线/面** 针对气象数据网格化的特点,本文采用 Marching Squares[16](移动正方形)方法抽取等值线,同时等值面的提取采用了与 Marching Squares 的算法思想基本一致的 Marching Cube[17]。

**直接体绘制** 传统的体绘制方法,往往以立方体、长方体或者圆柱构造三维体数据的代理几何并以所述代理几何为载体构造三维体纹理,且局限于在代理几何外围对其进行观察和旋转等操作。这种体绘制结果展示和交互方式与“地球是近似圆形的,相应的数据场也应该是围绕地球分布”的传统感知和认识不匹配。在本文系统的实现中,我们使用了一种支持三维体数据内部视点漫游的新型球面体绘制方法。

**切片绘制** 本文系统支持经纬、海拔两个方向的颜色映射切片的可视化方法。切片通过对三维气象数据的任意迫切面进行三线性采样,并应用合适的颜色映射将标量场数据映射到不同的颜色值。

### 2.2.2 球面体绘制

与传统的体绘制技术相比,本发明的有益效果在于:结合光线投射体绘制算法的优点,同时针对特定应用领域需要更符合领域专家、用户认知和感知的三维体数据可视化和交互方式的实际问题,提供一种支持三维体数据内部视点漫游的球面体绘制方法;与现有的方法相比,本发明以球面坐标表达的球形代理几何作为三维体纹理的载体,贴近气象、海洋等应用领域的需求和认知,实现和应用简单直观,同时实现以任意位置为光线积分起始点的光线投射体绘制效果,达到视点在体数据内部的漫游功能,使得用户可移动视点进入体数据内部任意位置,自由漫游观察整个数据和场景,从任意角度和位置观察体绘制结果,直接观察体数据的细节和结构,可增强用户对于三维数据场的感知,提高心理认同度,给用户更真实直观的感受和体验,营造



情景沉浸感,更有利于帮助用户从数据中发现未知的特征和知识,同时为未来的大屏高清可视化应用打下基础。此外,本发明充分地利用了图形硬件的优势,可满足实时渲染的性能要求。

系统中使用的球面体绘制方法基于传统的光线投射算法,采用球面坐标表达构造一个球形代理几何,并以球面坐标系下的三个空间维度坐标作为纹理坐标、以归一化后的三维体数据作为纹理数据、以所述球形代理几何作为载体构造三维体数据的三维体纹理,而在绘制过程前又将球面坐标转换回直角坐标表达,然后在光线投射过程中,通过当前视点与球形代理几何的相对位置判断当前视点是否进入球形代理几何,再结合直线与球的求交算法计算光线与球形代理几何的有效交点,由此获得不同的光线积分的初始点和光线积分的终止点,再从光线积分的起始点开始沿光线迭代地、递进地计算当前光线位置并将之转化为球面坐标表达以便将转化后的以球面坐标表达的当前光线位置作为纹理坐标进行三维体纹理查询,获得对应的三维体数据值,然后进行传输函数纹理查询,混合每个迭代步的颜色和不透明度直至光线积分的终止点,获得最终的体绘制图像,达到体数据内部视点漫游的效果。

**压缩域体绘制** 为了提高绘制效率、降低网络传输消耗,本文系统使用了一套基于 HVQ 和 PSH 的体数据压缩域体绘制方法,对体数据进行高压压缩比的近似无损压缩。对数据进行压缩及在压缩域进行体绘制解决了有限的存储资源、有限的 CPU 与 GPU 传输带宽和不断增加的体数据尺度以及领域专家对于高压压缩质量的实时压缩域体绘制的需求之间的矛盾。

### 2.2.3 矢量场数据可视化

针对三维矢量场数据(风场等),平台提供箭头、流线、LIC、粒子对流等可视化方法。

**图标法** 对于向量场数据最简单直接的方法就是将向量场中的向量直接画出来(如图 4.11)。箭头的方向代表向量场的方向,长度表示速度。另外还有粗细、颜色、形状等可以用来表示其他数据信息。

**几何法** 利用图标法可视化向量场虽然简单直接,但是难以适用到不同特征和维度的复杂向量场数据。在几何法中,研究人员采用不同类型的几何元素来模拟向量场的特征(如线(curve),面(surface),体(volume))。不同类型的几何元素和

方法适用于不同特征(稳定,时变)和维度(二维,三维)的向量场。本文主要使用了 StreamLine[24]的方法。

**纹理法** 由于在几何法中设计合理的种子点策略难度较大,需要用户对数据具有先验知识,因此传统的基于几何的方法在面对复杂的向量场时经常产生不理想的可视效果,基于此,研究人员以纹理图像的形式显示向量场的全貌,能够有效的减少几何法的缺陷。本文使用的是线积分卷积(line integral convolution, LIC)[25]的方法。

**动画法** 除了上述常见的矢量场可视化方法外,本文系统还添加了粒子对流等使用动画表达数据场的新型可视化方法。粒子对流通过粒子在矢量场中的流动动画地表达某一时刻的矢量场数据,直观、动态地展现矢量场的特征。

粒子对流技术首先在矢量场中播撒粒子,在每一帧绘制时使粒子沿所在位置的矢量方向移动,移动速度与矢量长度成正比。粒子移动轨迹被以由每次移动的线段组成的轨迹曲线表达,移动轨迹线段随着时间逐渐淡化,每个粒子轨迹上的线段淡化程度连续变化,成类似于彗星彗尾的渐变曲线。

(图, 4 个矢量场方法, 1 图)

## 2.3 混合绘制

大气场景中包含点、线、面、体等不同的可视表达模型,以及多种观测与计算的气象属性。传统上,针对不同的场景,分别采用不同的可视化方法和可视化流程。将三维栅格数据以二维切片的方式组织,并按距离视点远近,设置大气数据的透明度进行叠加显示,完成适于大气层析数据的三维可视化。这种方法简单,但只能获得三维的透明云层效果,难以刻画复杂的气象时空内部规律。

为了达到混合可视化的效果,本文系统采用了深度剥离技术用来渲染场景中的半透明物体,经过多层渲染,提取出多种半透明物体的不同层次的可视化结果。在深度剥离的结果的基础上,按照片元的深度顺序实现了几何、面、体的多属性混合,适用于场景中同时具有不透明几何体、半透明几何体和体绘制对象的应用情形。

具体的步骤如下:

**步骤 1** 挂载一张与绘制输出窗口同等大小的颜色纹理和一张与绘制输出窗口同等大小的深度纹理作为绘制输出的颜色缓冲区和深度缓冲区,然后开启绘制系统的深度测试功能,使用着色器程序直接绘制场景中的不透明几何体,得到一张颜色纹

理和一张深度纹理；

**步骤 2** 采用深度剥离技术对场景中的半透明几何体进行多次深度剥离，每次剥离过程得到一张与绘制输出窗口同等大小的颜色纹理和一张与绘制输出窗口同等大小的深度纹理；

**步骤 3** 构造场景中体数据的三维体纹理和体数据的代理几何体；

**步骤 4** 根据步骤 1 的绘制结果和步骤 2 生成的深度剥离结果，在绘制窗口中的每个像素位置上，对属于该像素的一组片断按保存在深度纹理中的深度值进行排序；

**步骤 5** 根据步骤 4 的结果，将属于绘制窗口中的每个像素位置上的所有片断从窗口坐标系变换到世界坐标系；

根据用户指定或设计的传输函数，在绘制窗口中的每个像素位置上，分别投射一条从视点出发的光线，采用经典的光线投射算法，分别逐步累积光线经过的体素的颜色值和不透明度值，并判断当前光线是否刚穿过该像素位置上经步骤 5 得到的某个片断，如果光线刚穿过了某个片断，则将该片断与当前的体素累积结果进行混合，否则继续累积体素的颜色值和不透明度值，直至满足给定终止条件。

### 3 跨平台构架实现

本文系统是一款并行可视化及分析引擎。该引擎支持 C/S（客户端/服务器）和 B/S（浏览器/服务器）模式，支持超大分辨率屏幕显示。系统既可以部署于普通 PC 机，作为客户端程序运行于本机，亦可运行于并行可视化系统的节点机器，为基于浏览器和大屏可视化系统提供基本的可视化服务。

#### 3.1 系统构架

基于浏览器和大屏的可视化系统要求具有强大的后台计算集群作提供基本的可视化服务。而浏览器和大屏幕作为交互和显示终端。Apache 服务器负责解析浏览器和大屏可视化系统发出的可视化任务，然后将任务交于部署了 VisNG 的 CPU/GPU 集群完成可视化，并返回相应的可视化结果。可视化期间所需要的数据由数据库提供，通过高性能网关进行访问。

#### 3.2 服务器端实现

平台在服务器端通过一台 Web 服务器对 Internet 上的用户提供数据获取服务。后端主要由由

MongoDB 数据库服务器、GPU 集群、数据管理服务器组成。

对于各种外网用户访问 Web 服务器，采用路由设备加防火墙来实现安全策略控制，并在 DMZ 区配置 Web 服务器，将内外网业务逻辑分离，提高了安全性。

数据管理服务器连通气象局内网，实时获取最新的气象数据，并对原始数据进行定标、金字塔切片等初步处理后，存入 MongoDB 数据库中。

GPU 集群由具有多个 GPU 和 CPU 的 NV 高密度 GPU 主机作为集群计算节点组成，而单台主机则作为可视化计算节点加入整个集群系统中，构成可视化计算集群。这样的体系对单个主机的要求较高，但同时由于一个集群内计算节点之间通过总线进行数据通信，节点间的互操作更加容易，也更加灵活方便扩展。GPU 集群负责从 MongoDB 数据库服务器中获取最新的气象数据，并对数据进行预处理，提取等值线、流线、LIC 等数据场的几何与拓扑特征，并对体数据进行压缩。预处理的结果存入 MongoDB 服务器中。

MongoDB 服务器存储最近一周的气象数据以及预处理结果，并 GPU 集群、Web 服务器、数据管理服务器提供读取接口，对 GPU 集群、数据管理服务器提供写入接口。数据存储在 RAID 磁盘阵列中，采用副本集的形式进行管理，防止磁盘损坏导致的数据丢失等损失。通过 SAN 集中存储层，MongoDB 服务器和其他服务器均可以同时使用高性能、大容量的光纤存储设备，备份系统也能通过 SAN 实现快速备份，而不影响业务运行。

Web 服务器、GPU 集群、数据管理服务器、MongoDB 服务器之间通过 IB 交换机连接，支持高速的数据传输。

#### 3.3 客户端实现

如图 5.1 所示，该系统主要包括两个部分：数据预处理与场景的实时绘制过程。

**数据预处理** 在数据预处理阶段，需要对地理信息数据构建基于 LOD 多分辨率模型的存储，将体数据解析，并根据用户的交互选择体绘制。

**场景实时绘制** 在实时绘制阶段，提供给用户基于视点的交互，根据用户的交互结果变换视点，做基于视点的场景剪裁，然后调度数据。本系统提供了场景管理器以支持多场景的综合绘制，根据用户选择在场景管理器添加或者删除对应的绘制物体，每个绘制物体都是一个独立的模块，可单独绘制，

也可与其他物体一同绘制。多个物体同时绘制时采用前文所述的混合绘制方法进行数据场的混合表达。

就具体实现而言，本文系统选择 Qt 作为系统搭建的整体框架。Qt 是一个跨平台的 C++ 用户界面应用程序开发框架，不仅提供了图形用户界面开发所需的所有功能，并且支持数据库连接、OpenGL、网络传输与多线程等程序开发常用功能，极大的方便了本文的系统开发。

### 3.4 B/S架构

B/S 构架与 C/S 架构基本相同，但由于浏览器性能和特性的限制，浏览器端代码在资源管理上进行了特殊处理以保证其性能和可靠性。同时，现行的浏览器无法很好的支持体绘制和混合绘制等复杂场景的绘制，因此本文采用了服务器远端绘制的方法，以牺牲一定的实时性为代价实现复杂场景的绘制工作。

**浏览器资源管理** 系统可能用到的资源包括下载的数据、用于绘制的内容和计算的结果等。这些资源在系统运行过程中会不断被下载、生成和访问。由于网页占用过多内存会导致浏览器运行效率下降(cite)，在进行绘制的同时要及时释放没有使用的数据、已经过期的内容和中间计算结果等无用资源。但另一方面，太过频繁的内存释放会导致资源的可复用性下降，带来额外的网络传输和计算开销，同样会降低系统的运行效率。因此需要一个资源管理的机制来控制数据下载、资源复用和释放内存，以提高系统的运行效率。

资源管理机制包括下载管理和资源请求管理。下载管理提供统一的数据下载接口，通过 AJAX 的方式从给定的地址下载数据。统一的下载接口可以最大程度的利用浏览器自身的缓存机制，避免浪费网络带宽。资源请求管理提供统一的接口供系统的其他模块创建和使用资源，资源由数据下载或计算产生后会被按类型存储并标记有唯一的编号，以便在重复请求相同资源时进行复用，减少下载和计算的开销。管理器还会定期销毁长时间不用的资源，释放其所占内存，绘制和计算模块也可以锁定重要资源以防止其被销毁。

**服务器端并行绘制** 目前的浏览器发展水平下，webGL 的绘制能力与 PC 端 OpenGL 仍有一定的差距，同时考虑到浏览器内代码的运行效率，体绘制、混合绘制等复杂绘制场景在 B/S 端难以实现。本文系统采用了由后端服务器绘制后以图像传回

显示的方法实现了对上述复杂情况的绘制功能。当用户需要绘制或更新一个复杂绘制对象时，浏览器代码向服务器端发送一个请求，请求中包含了需要绘制的数据编号、相机相关参数和可视化方法所需的参数等，服务器接收到请求后按所给参数进行绘制，会直结果会以图像的形式发还给浏览器端，随后浏览器端代码会将这个图像与系统中的其他对象进行混合显示。为了提高服务器端处理并发请求的能力，服务器端采用了并行绘制构架 Equalizer(cite)。

## 4 可视分析界面

### 4.1 界面设计与交互流程

B/S 架构和 C/S 架构都提供了丰富有效的交互来帮助用户更加灵活、便捷地使用系统，用户在定制数据、可视化方法、可视化参数等同时，还可以实现动画帧的控制、拾取、剖切等操作，配合二维三维联动的系统界面，对气象数据内容有更加精确地了解和探究。

用户通过使用二维、三维联动可以精确地得到相应的地理位置信息，精确的地理信息是一切气象数据探究的基础，同时，可以通过切换相机进行视点的切换、旋转等操作；系统提供了点拾取、廓线拾取、精确地理位置拾取三种拾取方法，可以对具体地理位置的数据的具体数值进行直观地观察和统计，具有准确性和实时性；系统实现了剖切操作，用来帮助用户针对多层的气象数据进行经纬方向的剖切操作，观察体数据的剖面特征，辅助以等值线、箭矢图等方法丰富剖切操作的可视化结果。这些交互都对用户更好的观测、分析气象数据有着明显地帮助作用。

除此之外，系统还提供了视频录制、截屏等操作，帮助用户管理可视化结果，增强系统的可拓展性。

### 4.2 与现有系统的对比

表 1 列出了以上几种常用的可视化软件与本文系统所支持功能的比较，从中可以看出本文系统不仅支持 GoogleEarth 与 WorldWind 所提供的三维地理信息可视化与二位的气象信息可视化功能，还在该基础上支持了三维的气象信息可视化，是对当前该领域软件的进一步提升。

表 1 与常用气象可视化软件的功能对比



软件名称	地理信息可视化		气象数据可视化	
	2D	3D	2D	3D
GrADS	√		√	
Micaps	√		√	
Vis5D	√		√	√
GoogleEarth		√	√	
WorldWind		√	√	
本文系统	√	√	√	√

## 5 案例分析

### 5.1 数据来源

### 5.2 卫星云图

系统提供针对卫星云图数据的时序动画可视化功能。系统数据库提供多个遥感卫星数据，包括风云 2C、风云 2D 以及多个卫星的拼接数据的卫星云图数据，系统实现以颜色映射的可视化方法，并支持以动画播放的形式表现时序性卫星数据。

用户通过选择对应卫星、通道的卫星云图数据列表，勾选相应的时间节点的卫星数据，设置相应的颜色映射参数，即可显示卫星云图的动画可视化结果。用户通过观察带有半透明通道的卫星云图可视化结果，观测卫星遥感数据的演变趋势，极值特征区域等数据特征，进而分析卫星数据的对应的通道的数据。此外，系统可以同时添加多个卫星数据源的卫星数据，可以针对同一时间节点的卫星数据同时进行可视化，将多个卫星数据拼接成为一个全球范围内的卫星云图时序可视化结果。

同时，系统配合实现相应的动画控制器，用户可以灵活地对动画帧进行暂停、前进、后退、拖拽等操作。使可视化的结果具有更佳地交互性和观察性。

### 5.3 多气象变量场混合

系统支持多气象属性变量数据的叠加可视化效果，用户可以根据自己的需求定制相应的多气象属性数据的混合可视化结果。系统数据库包括遥感数据、数值预报数据等不同类型的气象数据。系统针对不同类型的气象属性制定不同的可视化方法，支持颜色映射、等值线、直接体绘制、等值面的标量场数据可视化，箭头图、线积分卷积、流线、粒子对流的矢量场数据可视化，并支持多种可视化方法的混合绘制可视化。

通过叠加相同时间范围内风场、温度场的可视化结果，用户可以观察风场和温度场之间的相互影响关系，风场的演化趋势会影响温度场寒流、暖流的变化趋势；通过叠加相同时间范围的遥感数据云图、相对湿度的海拔方向的切片颜色映射结果，可以观察卫星云图与数值预报的相对湿度的一致性；通过叠加温度场等值线和切片结果，可以观察温度场的具体的数值信息，增强对数据的具体数值的感知。

综上所述，用户可以灵活地通过选择数据、设置可视化方法及对应参数，在系统中同时展现多种气象数据的可视化结果，可以通过不同可视化模块的可视化结果进行气象属性的相互之间的作用关系的分析、验证等。

## 6 总结与未来工作

### 7.1 未来工作

大屏可视化

新型交互手段

致谢本文感谢浙江大学可视化与可视分析小组的热心帮助。

### 参考文献

[1]